

基于二维光子晶体点缺陷可调谐光功率分配器

王 荣 梁斌明 张礼朝 庄松林

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要 在二维矩形阵列结构硅光子晶体中去除中间一排硅柱形成线波导, 在线波导右侧引入点缺陷。利用时域有限差分法(FDTD)模拟仿真以及数值分析研究线波导中光耦合特性, 计算出两个通道的分光比, 发现改变光子晶体的温度可以明显改变这两个通道的光功率比。基于此结构, 提出了一种新的光功率分配器, 可以获得大范围的光功率比值, 从 1:1~90:1 都可以通过改变光子晶体的温度来实现, 并且当温度从 0 °C~200 °C 就可以实现这一功能, 最后设计了一款三通道可调谐光功率分配器, 通过调节两个点缺陷区域内温度来实现光功率的分配。

关键词 光学器件; 光子晶体; 时域有限差分法; 光功率分配器; 点缺陷; 光耦合特性

中图分类号 TN252 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0123001

Tunable Optical Power Splitter Based on the Point Defects of Two-Dimensional Photonic Crystal

Wang Rong Liang Binming Zhang Lichao Zhuang Songlin

(College of Optical and Electronic Information Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract In two-dimensional rectangular array photonic crystal, one parallel line waveguides are formed by removing the middle line silicon pillars. On the right of the line waveguide, a point waveguide has been introduced. It's coupling properties are investigated by use of finite-difference time-domain (FDTD) method and the splitting ratio of two channels has been counted. The results show that the splitting ratio changes obviously is found when the temperature of the photonic crystal is rising. A new optical power splitter is brought forward based on this research and a wide range of light power ratios, from 1:1 to 90:1 can be obtained. This function can be realized by regulating the temperature from 0 °C to 200 °C. Finally a three channels and tunable optical power splitter is designed, which can distribute the power of the light by adjusting the two point defects' temperature.

Key words optical devices; photonic crystal; finite-difference time-domain; optical power splitter; point defect; optical coupling characteristics

OCIS codes 230.1360; 350.4600; 230.5298; 130.5296; 060.4510

1 引 言

光子晶体^[1,2]的概念最早是在 1987 年提出的, 光子晶体是一种折射率呈空间周期性变化的新型微结构材料, 其最基本的特性就是具有光子禁带^[3]。频率在光子禁带频率内的光不能在光子晶体中传播。当

在光子晶体中引入缺陷时, 光子禁带中会出现一个缺陷模, 使原本不能在光子晶体中传播的光能在缺陷中传播, 这就形成了光子晶体波导。利用光子晶体的这种禁带特性可以设计制作各种光学集成器件, 如新型波导、新型波长选择滤波器、滤波片^[4]和光子晶体耦

收稿日期: 2011-06-29; **收到修改稿日期**: 2011-07-27

基金项目: 国家 973 计划(2007CB935300)、国家自然科学基金(60777045)和上海市科学技术委员会 07 年创新项目(07DZ22026)资助课题。

作者简介: 王 荣(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事光子晶体理论与器件等方面的研究。

E-mail: wangyun531287019@163.com

导师简介: 梁斌明(1977—), 男, 博士, 副教授, 主要从事新型微纳米材料和电磁理论等方面的研究。

E-mail: bmliang78@yahoo.com.cn

合器、光开关^[5]、分功率器^[6~10]等。

随着电信业务的发展,需要采用分光比可调的光功率分配器的场合越来越多。光纤城域网、光纤到户(FTTH)及光纤 CATV 的逐步普及应用,使得光功率分配器的市场需求越来越大。利用双折射晶体分光、合光及微光学偏振光干涉技术可以制作与偏振无关的可调光功率分配器^[11,12],这样的光功率分配器具有插入损耗低、偏振无关和可调范围大等优点,完全达到了实用要求;采用在普通光纤型耦合器的熔锥部分加应力的办法可以改变两个输出端口的分光比。但用这些方法制作的光功率分配器都存在可调谐范围小、偏振相关度高、控制精度低和成本高等缺点,应用价值十分有限。本文利用光子晶体中的点缺陷和线缺陷,通过改变光子晶体的温度,分析与研究了光子晶体中波导之间的耦合特性,并利用该结构提出了一种新型的光功率分配器,两通道的分光比可以从 1:1~90:1 任意调节。与一般的光功率分配器比较,本文的创新点是:利用光子晶体点缺陷,通过改变光子晶体的温度调节分光比,最后设计了一种三通道可调光功率分配器,可以通过改变点缺陷区域内的温度来控制三通道的分光比,器件的特点:体积小,分光比可调范围大,并且具有多通道调节功能,从而大大满足了现实需求。

2 结构和原理分析

2.1 结构模型

圆形介质柱是按照矩形晶格周期性排列的,构成完整的光子晶体。整个结构参数如下:晶格常数为 a ,基底介质为折射率 $n_0 = 1$ 的空气,介质柱为折射率为 $n = 3.4$ 的硅柱,介质柱直径 $d = b \times a$,其中 b 为大于 0 小于 1 的常数(图 1)。

利用光子晶体的线缺陷可以实现波导通道,利用点缺陷可以实现频率选择,线缺陷和点缺陷的组合能够有效地从光子禁带中选择某种频率的缺陷态光子,在禁带中其他频率被禁止的同时,使该缺陷态光子低损耗地通过,基于这些原理,在光子晶体中引入点缺陷和线缺陷,结构模型如图 2 所示。

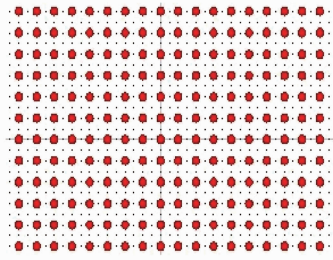


图 1 矩形二维光子晶体结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of rectangle 2D photonic crystal

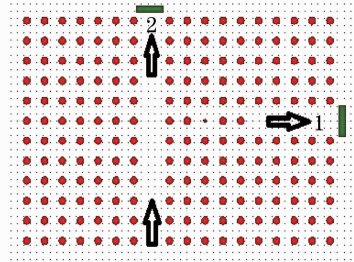


图 2 结构模型

Fig. 2 Structure model

2.2 理论分析

二维光子晶体中的电磁场可以分为横电模(TE)和横磁模(TM),由介质柱组成的光子晶体在 TE 模式下光子禁带现象明显^[13~15]。本文以硅作为介质柱的二维光子晶体为例,采用 TE 模式。时域有限差分法(FDTD)^[16]是数值分析光子晶体特性最重要方法之一。用 FDTD 方法计算禁带,对于各向异性材料,与时间相关的麦克斯韦方程可以写成下面的形式:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}, \quad \nabla \times \mathbf{H} = \epsilon_0 \epsilon(r) \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}, \quad (1)$$

对 TE 模,矢量式可简化为标量式:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_y}{\partial Z} &= \epsilon_0 \epsilon(r) \frac{\partial E_X}{\partial t}, & \frac{\partial H_y}{\partial X} &= \epsilon_0 \epsilon(r) \frac{\partial E_Z}{\partial t}, \\ \frac{\partial E_Z}{\partial X} - \frac{\partial E_X}{\partial Z} &= -\mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t}. \end{aligned} \quad (2)$$

D_x, D_z 表示空间步长, D_t 表示时间步长。通过中心差分法可将(2)式离散化得到有限时域差分方程式:

$$\begin{aligned} H_y^{n+1/2} \left(i + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) &= H_y^{n-1/2} \left(i + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) - \frac{D_t}{\mu_0} \left\{ \frac{1}{D_x} \left[E_z^n \left(i + 1, k + \frac{1}{2} \right) - E_z^n \left(i, k + \frac{1}{2} \right) \right] - \frac{1}{D_x} \left[E_z^n \left(i + \frac{1}{2}, k + 1 \right) - E_z^n \left(i + \frac{1}{2}, k \right) \right] \right\}, \\ E_x^{n+1} \left(i + \frac{1}{2}, k \right) &= E_x^n \left(i + \frac{1}{2}, k \right) + \frac{D_t}{\epsilon_0 \epsilon(r)} \left\{ \frac{1}{D_z} \left[H_y^{n+1/2} \left(i + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) - H_y^{n+1/2} \left(i + \frac{1}{2}, k - \frac{1}{2} \right) \right] \right\}, \end{aligned}$$

$$E_z^{n+1}\left(i, k + \frac{1}{2}\right) = E_z^n\left(i, k + \frac{1}{2}\right) + \frac{D_z}{\epsilon_0 \epsilon(r)} \left\{ \frac{1}{D_x} \left[H_y^{n+1/2}\left(i + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) - H_y^{n+1/2}\left(i - \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) \right] \right\}. \quad (3)$$

重复不断地求解(3)式,可以得到电磁场的传播规律。在时域有限差分方法中要得到稳定解,时间步长必须受到空间步长的限制,时域有限差分方法是建立在一个有限的计算区域,而求解电磁场是假定空间无限大。因此需要利用吸收边界条件(ABC)解决两者之间的矛盾,使得边界无明显反射。在文中所采用的是完美匹配层边界条件(PML)。

3 数值模拟与结果讨论

3.1 光子晶体介质柱折射率发生微小变化时的光子禁带

光子晶体参数为:晶格周期 $a=0.546 \mu\text{m}$, 介质柱折射率 $n=3.4$, 背景材料为空气, 介质柱半径 $r=0.19 \times a$, 由于光子晶体(硅)的热光系数^[17]为 $1.86 \times 10^{-4}/\text{C}$ 当温度发生变化时, 介质柱折射率会发生微小变化, 在模拟仿真中, 主要研究温度的变化所产生的影响, 图3是光子晶体的折射率由于温度的改变发生微小变化时, 光子禁带的范围。

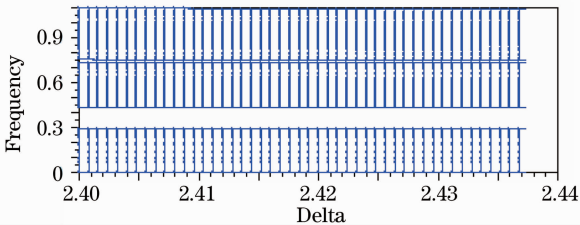


图3 光子禁带

Fig. 3 Photonic band gaps

当光子晶体温度从 $0 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 光子晶体折射率范围为 $3.4000 \sim 3.4372$, 图3中 Delta 表示硅介质柱折射率与空气折射率之差, 光子禁带如图3所示, 表明光子禁带随温度的变化基本不会发生改变, 在一定温度范围内, 温度的改变不会影响光子晶体的物理特性。

3.2 光子晶体点缺陷半径对通道1最大透射率波长的影响

当光子晶体温度保持不变时, 只改变点缺陷的半径, 波导中的光波频率与点缺陷微腔的缺陷频率产生共振时的频率也会发生变化, 利用时域有限差分方法, 经过多次模拟分析, 不同的点缺陷半径对应的最大透射率波长也会发生改变。

在禁带范围内, 改变点缺陷的半径, 当点缺陷半径

为 $r_1=31.0 \text{ nm}$ 时, 最大透射率波长为 $\lambda_1=1490 \text{ nm}$, 逐渐增大点缺陷半径, 通道2的最大透射率波长会发生改变, 如图4所示, 在禁带范围内, 最大透射率波长随点缺陷半径的增大而增大。

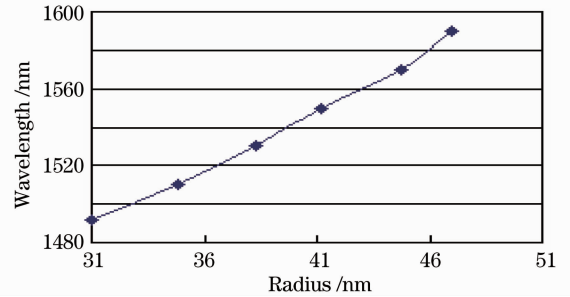


图4 最大透射率波长与点缺陷半径的关系

Fig. 4 Wavelength with maximum transmission versus different point defect radii

3.3 不同温度下对两个通道光功率分配的影响

在光子晶体中引入线缺陷和点缺陷后, 如图2所示, 点缺陷半径 $r_2=38.4 \text{ nm}$ 时, 当波导中的光波频率与点缺陷微腔的缺陷频率产生共振时, 该频率下的光能量将被耦合到波导1中, 如图2所示。选取入射波长为 $\lambda_2=1530 \text{ nm}$, 入射光能量取1。当光子晶体温度发生变化时, 光子晶体的折射率也会发生一定的变化, 点缺陷的耦合效果也会发生变化, 波导1和波导2中的光功率也会发生变化, 从而可以通过温度来控制光功率的分配, 模拟结果如图5所示。

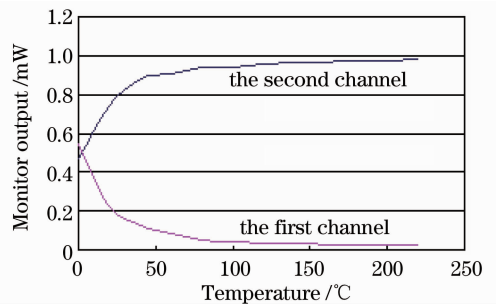


图5 两通道光功率与波长的关系

Fig. 5 Light power in two channels versus different temperatures

如图5可知, 当入射波长为 1530 nm , 入射光能量取1, 点缺陷半径为 38.4 nm 时, 通道2中的部分光能量将被耦合到通道1中, 从而实现了光功率的分配, 当温度升高时, 通道1中的光功率随着温度的升高而减小, 通道2中的光功率随着温度的升高而增加。当光子晶体温度接近 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 两输出端光功

率相等。当温度逐渐增大到 200 ℃时,输出端 2 的光功率为 0.96488,输出端 1 的光功率为 0.007394,两输出端光功率分光比可从 1:1~90:1之间变化,变化曲线如图 6 所示。特定分光比对应的光子晶体温度值如表 1 所示。如果继续升高温度,两输出端光功率分光比会继续增大,可以接近于无穷大。

对所得软件模拟结果进行处理,为了知道温度对光功率分配的影响,将输出端 2 的光功率值除以输出端 1 的光功率值,可以得到这两输出端口的光功率比值,对两曲线相除后取得数据进行拟合得到一条平滑的单一递增变化的曲线,如图 6 所示,横坐标 x 表示光子晶体的温度,纵坐标 y 表示输出端 2

与输出端 1 的光功率比值,其表达式为

$$y = 0.002x^2 + 0.035x + 1.058. \quad (4)$$

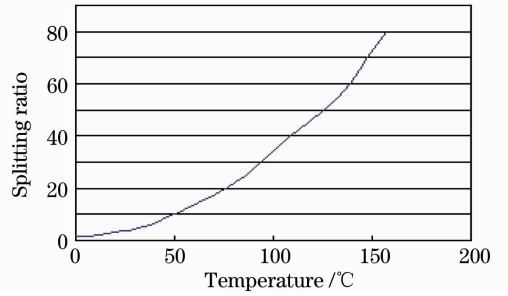


图 6 两通道分光比随温度的变化曲线

Fig. 6 Splitting ratio of two channels versus different temperatures

表 1 特定分光比所对应的光子晶体温度值

Table 1 Different temperatures corresponding to specific splitting ratio

Splitting ratio	1:1	2:1	3:1	4:1	5:1	6:1	7:1	8:1	9:1
Temperature / °C	0	12	20	27	32	37	41	44	47
Splitting ratio	10:1	20:1	30:1	40:1	50:1	60:1	70:1	80:1	90:1
Temperature / °C	50	76	94	109	125	139	148	157	200

4 应 用

基于上述的分析结果,设计一个基于二维光子晶体点缺陷的三通道可调谐光功率分配器。分配器大小为 $28a \times 25a$,其中 a 为光子晶体的晶格常数。选取入射波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$,入射光能量取 1,晶格常数 $a = 0.546 \mu\text{m}$,硅柱的半径 $r = 0.19 \times a$,点缺陷半径为 $r_2 = 0.0412 \mu\text{m}$,功率分配器中具有点缺陷和线缺陷(如图 7)在输出端 1 加上一个能量探测器,在输出端 2 和 3 的出口处各加上一个能量探测器,在两个点缺陷局部区域分别加上一个加热片,对区域 I 和 II 进行加热,用来改变它们的温度(加热时两区域附近的温度不会受彼此的影响)。在软件模拟过程中:光从 1 通道的下端输入,由于点缺陷的存在,在传输过程中会发生耦合作用,通道 1 中的光会通过点缺陷耦合到通道 2 和 3 中,从而实现光功率的分配。当光子晶体的温度发生变化时,则三个输出端的能量探测器探测到的能量会发生变化,并且光能量变化范围很大,三个通道的分光比也会发生很大的变化,这样通过改变光子晶体的温度实现了多通道光功率的可调谐变化。

分析结果表明,同时给两个加热片加热时,区域 I 和区域 II 的温度会发生变化,区域内介质柱的折射率也会发生微小变化,当区域 I 温度为 10 ℃,区域 II 的温度为 60 ℃时,3 个输出端口的光功率相

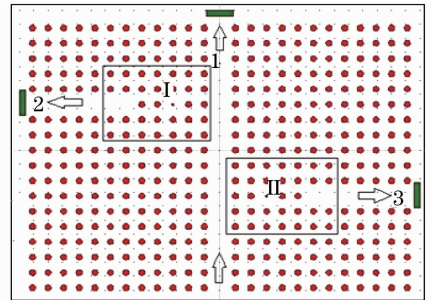


图 7 三通道可调谐分光功率器结构模型图

Fig. 7 Model of three-channel tunable power splitter structure

等,它们的分光比为 1:1:1,模拟结果如图 8(a)所示;当区域 I 温度为 12 ℃,区域 II 温度为 38 ℃时,输出端 1 的光功率为 0.2,输出端 2 的光功率为 0.2,输出端 3 的光功率为 0.6,分光比为 1:1:3,如图 8(b)所示。

逐渐增加区域 I 的温度,减小区域 II 的温度,发现输出端 3 的光功率会迅速增大,输出端 1 和 2 的光功率会相应减小,当区域 I 温度为 20 ℃,区域 II 温度为 15 ℃时,输出端 1 的光功率为 0.2,输出端 2 的光功率为 0.1,输出端 3 的光功率为 0.7,分光比为 2:1:7,如图 8(c)所示;保持区域 I 的温度不变,逐渐增加区域 II 的温度,输出端 2 的光功率会迅速增大,当区域 I 温度为 20 ℃,区域 II 温度为 43 ℃时,输出端 1 的光功率为 0.6,输出端 2 的光功率为 0.1,

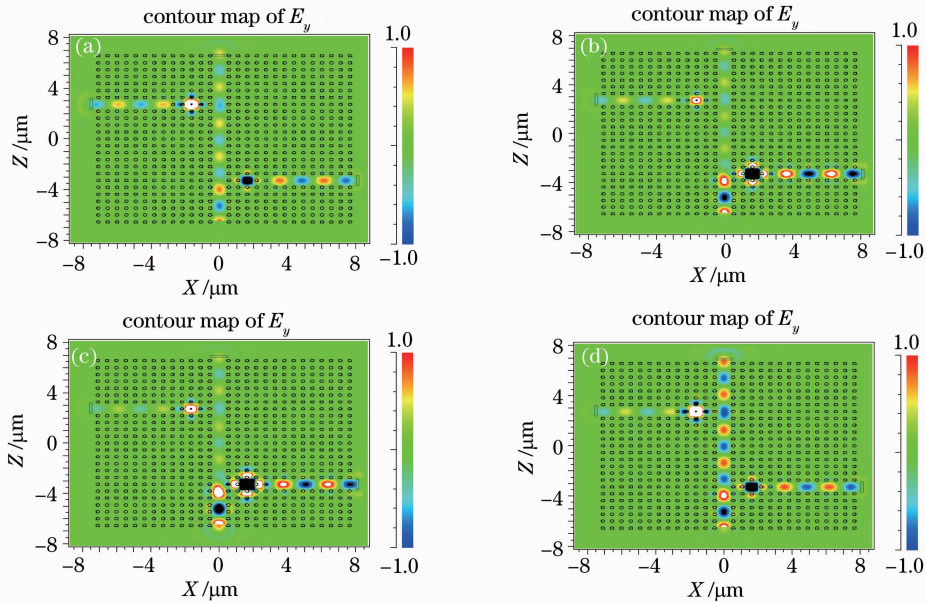


图 8 不同温度下的电场强度分布图

Fig. 8 Electric-field strength distribution with different temperature

输出端 3 的光功率为 0.3, 分光比为 6:1:3, 如图 8 (d) 所示。因此, 当改变区域 I 和区域 II 的温度时, 3 个输出端的光功率会大幅度发生变化, 从而实现了光功率可调谐的目的。

5 结 论

对光子晶体中线缺陷和点缺陷的耦合现象及其特性分析, 发现光子晶体的温度会对耦合产生明显的影响, 从而使两个输出端的光功率发生明显的变化, 并利用该光子晶体结构耦合特性设计了一款含点缺陷的三通道光功率分配器件, 通过时域有限差分法模拟, 结果表明, 通过改变点缺陷附近的温度, 三个输出端的光功率会发生明显变化, 可以实现功率比的任意分配。该结构简单、体积小且测试方法简单, 只需要控制局部光子晶体的温度就能够实现光功率的任意分配, 在此基础上, 还可以设计更多通道的可调谐光功率分配器, 从而可满足人们对多通道可调谐分光比的要求, 特别是一些较大分光比的需求。

参 考 文 献

- 1 E. Yablonovith. Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 2 S. John. Strong localization of photon in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 3 K. M. Ho, C. T. Chan, C. M. Soukoulis. Existence of a photonic gap in periodic dielectric structures[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **65**(10): 3152~3155

- 4 Wang Jizhou, Xiong Yuqing, Wang Duoshu *et al.*. Filtering characteristics and application of defect mode of one-dimensional photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2915~2919
- 王济洲, 熊玉卿, 王多书等. 一维光子晶体缺陷模的滤波特性及应用研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2915~2919
- 5 Tan Chunhua, Huang Xuguang. An all optical switch based on the tunable bandgap of a two-dimensional photonic crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2714~2718
- 谭春华, 黄旭光. 基于带隙可调的二维光子晶体全光开关[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2714~2718
- 6 Gao Yongfeng, Zhou Ming, Zhou Jun *et al.*. Design of power splitter by directional coupling between photonic crystal waveguides[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0505003
- 高永锋, 周明, 周骏等. 光子晶体波导定向耦合功分器的设计[J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0505003
- 7 Liu Song, Liu Shaobin, Wang Shenyun. Filter property analysis of plasma photonic crystal with tunable defect [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(2): 146~150
- 刘崧, 刘少斌, 王身云. 可调缺陷层等离子体光子晶体的滤波特性分析[J]. *光电工程*, 2010, **37**(2): 146~150
- 8 Michle Belotti, F. Juan, Galisteo-Lopez *et al.*. All-optical switching in 2D silicon photonic crystals with low loss waveguides and optical cavities [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(15): 11624~11636
- 9 Guo Hao, Wu Ping, Yu Tianbao *et al.*. Design of large separating angle ultracompact multiway beam splitter based on photonic crystal ring resonators[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1501~1505
- 郭浩, 吴评, 于天宝等. 光子晶体环形谐振腔大角度超微多路光分束器的设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1501~1505
- 10 Tan Chunhua, Huang Xuguang. Two-dimensional photonic crystal optical switch controlled by polarized light[J]. *J. Appl. Opt.*, 2008, **29**(3): 452~456
- 谭春华, 黄旭光. 光控二维光子晶体光开关[J]. *应用光学*, 2008, **29**(3): 452~456
- 11 Liu Xiang, Zeng Shunquan. Power splitter with arbitrary ratios in periodic dielectric waveguides[J]. *Optoelectronic Technology*, 2010, **30**(2): 118~121
- 刘祥, 曾顺泉. 基于周期介质波导可任意比例的功率分配器

- [J]. 光电子技术, 2010, **30**(2): 118~121
- 12 Li Shu, Zhuge Qunbi, Lin Qiao *et al.*. Multimode polymeric optical power splitter based on an asymmetrical structure using laser direct writing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3221~3226
李 书, 诸葛群碧, 林 巧 等. 激光直写非对称多模高聚物光功率分配器[J]. 光学学报, 2010, **30**(11): 3221~3226
- 13 E. H. Khoo, A. Q. Liu, J. H. Wu. Modified step-theory for investigating mode coupling mechanism in photonic crystal waveguide taper[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(13): 6035~6054
- 14 Edo Wakes, Jelena Vuckovic. Coupled mode theory for photonic crystal cavity-waveguide interaction [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(13): 5064~5073
- 15 Patric Strasser, Ralf Fluchiger, Roubert Wuest *et al.*. InP-based compact photonic crystal directional coupler with large operation range[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(13): 8472~8478
- 16 Feng Li, Liang Binming, Zhuang Songlin. Dependence of negative refraction phenomenon on incident light frequency[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(3): 61~65
冯 莉, 梁斌明, 庄松林. 入射光频率变化对负折射现象的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2008, **45**(3): 61~65
- 17 Tong Kai, Cui Weiwei, Wang Meiting. Temperature measurement with one dimensional defect photonic crystal[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(2): 762~766
童 凯, 崔卫卫, 汪梅婷. 一维缺陷光子晶体温度的测量[J]. 物理学报, 2008, **57**(2): 762~766

栏目编辑: 韩 峰